

Finite Elemente Berechnungen von Structural Glazing Elementen im Bauwesen und geklebten Frontscheiben im Automobilbau – ein Vergleich

Bau 2003, München

Verbindungstechnik im Bauwesen

14.01.2003

*Dipl.-Ing. Thorsten Böger **

*Dr.-Ing. Gerhard Schmöller **

Abstract

Die Klebtechnik wird aufgrund zahlreicher technologischer und wirtschaftlicher Vorteile und der Weiterentwicklung der Klebstoffe im Bauwesen und im Maschinenbau zunehmend eingesetzt. Dabei wird insbesondere dem strukturellen Kleben als zukunftsfähigem Fügeverfahren mit zahlreichen Funktionsvereinigungen der Vorzug gegeben.

In diesem Vortrag werden anhand von Beispielen aus dem Bauwesen (Structural Glazing) und dem Automobilbau (Direktverglasung, z. B. geklebte Frontscheibe) aus Sicht des Maschinenbauingenieurs die Möglichkeiten von FE-Simulationen beschrieben.

Im Bauwesen wird das Structural Glazing seit einigen Jahren europaweit erfolgreich eingesetzt. Die dabei verwendeten Klebstoffe sind aufgrund ihrer hervorragenden Alterungsbeständigkeit und ihrem breitem Haftungsspektrum durchweg Silicone, die klassischerweise als reine Dichtstoffe Anwendung finden. Die Dimensionierung erfolgt über analytische Ansätze und Bemessungsfaktoren, die auf langjährigen Erfahrungen beruhen. Es kommen genormte Kleinteilproben und bauteilähnliche Prüfkörper zum Einsatz (Kennwerte, Bruchverhalten, Alterung) [1]. Die Fassadensysteme unterliegen baurechtlichen Abnahmeprüfungen.

Im Automobilbau ist die Direktverglasung eine typische klebtechnische Anwendung, bei der Front- und Heckscheibe in die Karosserie eingeklebt werden. Die Vorteile sind neben der erhöhten Torsionssteifigkeit der Karosserie die kombinierte Dichtwirkung und die akustische Dämpfung. Die Kennwertermittlung und die Charakterisierung der Verbundeigenschaften erfolgen hier ebenfalls an genormten Kleinteilproben und bauteilähnlichen Prüfkörpern (z. B. [2]). Die Bauteilauslegung erfolgt heute weitgehend mittels FEM („digitales Automobil“). Simulationen unterschiedlicher Lastfälle und daraus ableitbare konstruktive Verbesserungen helfen, eine Direktverglasung mit massgeschneiderten Eigenschaften herzustellen.

* **immersive SIM engineering** GmbH, München, <http://www.immersive-sim.de>

Strukturelle Klebungen werden im Automobilbau im allgemeinen mit Epoxidharzsystemen ausgeführt, die über einen hohen Schubmodul verfügen. Die Klebschichtdicken liegen im Bereich von einigen Zehntel Millimetern. Für Scheibenverklebungen können diese Klebstoffe nicht zum Einsatz kommen, da bei größeren Verwindungen der Karosserie (einseitiges Bordsteinparken) infolge der geringen Nachgiebigkeit der Verbindung kritische Spannungsspitzen entstehen, die zum Scheibenbruch führen können. Diese Problematik kann durch eine höhere Nachgiebigkeit des Verbunds (geringerer Schubmodul des Klebstoffs) und größere Klebschichtdicken (Relativbewegungen in der Fuge) entschärft werden. Dazu kommen PUR-Scheibenklebstoffe (Schubmodul ca. 3 MPa) mit Klebschichtdicken in der Größenordnung von 5 mm zum Einsatz. Somit ist die relativ starre Scheibe über die angepasste Nachgiebigkeit der Verbindung in die tragende Struktur der Karosserie integriert (semi-strukturelles Kleben). Diese Aspekte lassen sich auf das „Structural Sealant Glazing“ (offizielle Bezeichnung [1]) übertragen (nochmals geringerer Schubmodul der Silicone, Klebschichtdicken ca. 7 mm).

Im Folgenden werden relevante Aspekte zu beiden Anwendungen beschrieben und die Möglichkeiten von FE-Simulationen verglichen.

Structural Glazing

Hauptvorteile:

- neue Designkonzepte
- verbesserte Wärmedämmung
- Funktionsvereinigung Dichten/Tragen/Isolieren
- Modul-Bauweise
- Akustik (Schallschutz)
- Selbstreinigungseffekt (geringere Unterhaltskosten für Fassaden)

Erfordernisse und bautechnische Aspekte:

- bauaufsichtliche Eignungs- und Abnahmeprüfung
- Fremdüberwachung der Fertigung
- Bemessung über analytische Ansätze und Empirie
- Alterungsbeständigkeit (Feuchte, UV, Temperaturwechsel, usw.)
- Haftung auf unterschiedlichen Substraten, eventuell Einzelfallprüfungen
- Ableitung statischer Lasten in die Unterkonstruktion (Eigengewicht Scheiben) [1]
- hohe Sicherheitsrelevanz
- in Deutschland: mechanische Auffangvorrichtung ab Einbauhöhen > 8 m [6]
- Forderung im Versagensfall: reiner Kohäsionsbruch in der Klebschicht [6].

Klebstoffe und Fügeitwerkstoffe:

Aufgrund ihrer hervorragenden Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse und ihrem breiten Haftungsspektrum auf unterschiedlichen Fügeitoberflächen kommen ausschließlich Silicon-Systeme (einkomponentig feuchtigkeitshärtend oder zweikomponentig) zum Einsatz. Bei der Festlegung auf Silicone spielt die langjährige Erfahrung mit diesen Dichtstoffen und ihre Robustheit eine wichtige Rolle.

Die Klebschichtdicke liegt im Bereich von ca. 7 mm [3], sie wird in Abhängigkeit von der Länge der kurzen Elementkante und der maximal zu erwartenden Windlast analytisch berechnet (bei unterstützten Systemen).

Das hydrophile und somit generell eher schwer zu klebende Glas ist im Bauwesen oft beschichtet (verbesserte Wärmedämmung, Entspiegelung). Im Einzelfall müssen diese Beschichtungen im Bereich der Klebfläche entfernt werden. Um die Unterwanderung der Klebverbindung durch Feuchte zu vermeiden, erfolgt eine Oberflächenvorbehandlung.

Die Unterkonstruktion der Structural Glazing-Elemente besteht aus Profilsystemen aus anodisierten oder pulverbeschichteten Aluminiumlegierungen, oder aus Edelstahl. Bei Pulverbeschichtungen können Haftvermittler (Grundierung) erforderlich werden.

Weitere Bauteile (Abstandshalter, Klotzung, Dichtungen), die nicht direkt Bestandteil der Klebkette sind, bestehen aus unterschiedlichen polymeren Werkstoffen, deren Kompatibilität zu Siliconen im Einzelfall überprüft werden muss.

Der Nachweis der bautechnischen Verwendbarkeit als Structural Glazing-Klebstoff erfordert u. U. zeit- und kostenintensive Prüfserien nach Freigabe-Vorschriften für die im zuzulassenden System jeweils gültigen Bedingungen.

FEM-Aspekte im Structural Glazing:

Beim Structural Glazing sind, wie oben erwähnt wurde, analytische Formeln und Bemessungsfaktoren die Basis für die Dimensionierung. Dabei findet eine Vergleichmäßigung von Spannungen auf homogene Verteilungen statt.

Die FEM kann dazu dienen, überlagerte Lastfälle zu analysieren und daraus konstruktive und materialtechnische Verbesserungen abzuleiten. Dabei ist die Erfassung dreidimensionaler Spannungs- und Dehnungszustände ein wesentlicher Vorteil zur Optimierung kritisch beanspruchter Bereiche (Bauteildesign, Materialauswahl). Ein wichtiges Szenario z. B. bei Isolierglaseinheiten sind Druckunterschiede zwischen der Atmosphäre und dem Scheibenzwischenraum (eingeschlossenes Volumen).

Grundsätzlich sind die meisten im Bauwesen auftretenden Lastszenarien einer FE-Berechnung zugänglich. Dazu zählen statische, thermische, dynamische und akustische Simulationen. So lassen sich z. B. aus der FE-Simulation einer inhomogenen Erwärmung wertvolle Erkenntnisse über maximale Spannungen in lokalen Bereichen gewinnen (hier vereinfacht, ohne Wärmeleitung und Scheibenzwischenraumklima):

Maximale Hauptspannung nach inhomogener Erwärmung, qualitativ, überhöhte Deformationen

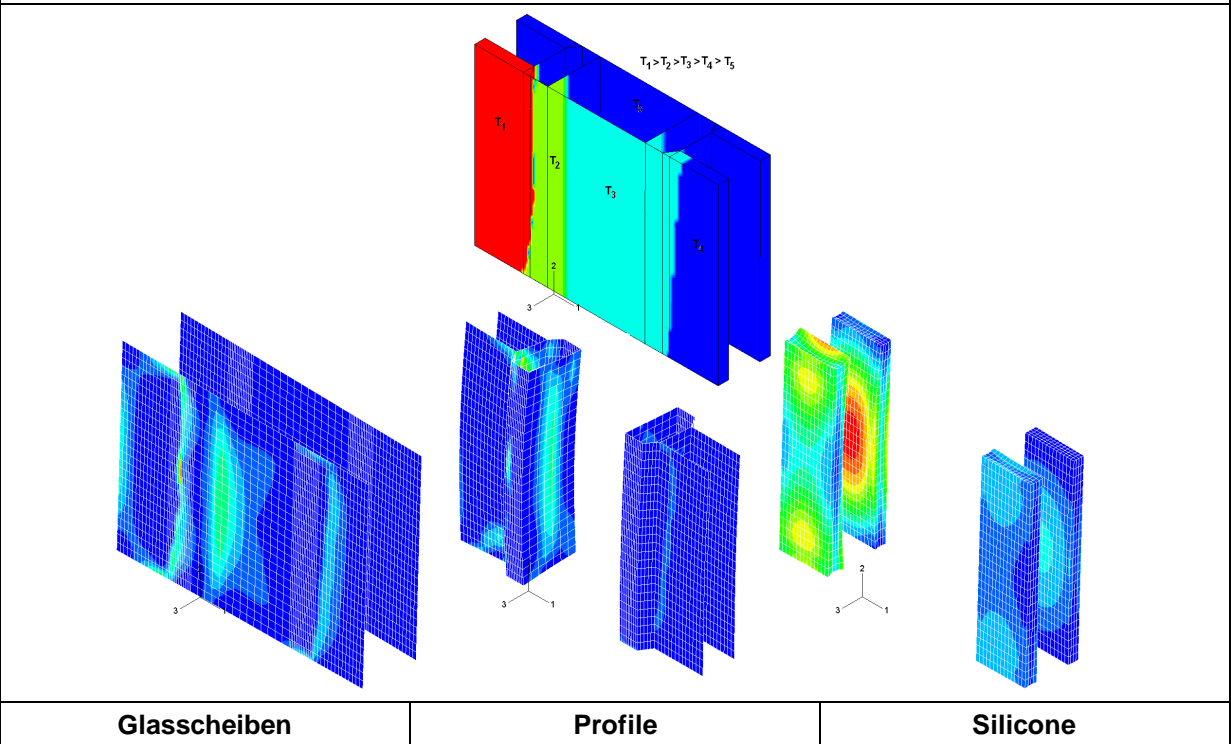


Bild 1: Überwachungskörper SG-Element, Simulation inhomogene Temperaturverteilung (nach [6])

Die Berücksichtigung zeit- und temperaturabhängiger Effekte in den Siliconen (Kriechen, Hyper- und Viskoelastizität, usw.) kann bei Vorliegen zuverlässiger Daten (Messaufwand) mit gängigen General-Purpose FE-Programmen erfolgen. Für vergleichende Berechnungen kann aber bereits die linear-elastische Formulierung der Klebschichten eine Bewertungsgrundlage für wesentliche Effekte im Bauteil

liefern (im Bereich kleiner Dehnungen). Alterungseinflüsse können nur durch vergleichende Simulationen unter Vorgabe der entsprechenden Messdaten (z. B. σ - ε -Zusammenhang) untersucht werden.

Extrem dünne Schichten und adhäsive Effekte im Interface sind heute in der FEM nicht abbildbar, so dass in der Simulation von den mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs ausgegangen werden muss.

Aus eindeutig definierbaren Lastfällen ließe sich mit Hilfe der FEM ein virtueller Klebstoff definieren, dessen erforderliche Eigenschaften in fachübergreifender Zusammenarbeit mit Klebstoffherstellern chemisch eingestellt werden könnten.

Direktverglasung

Hauptvorteile:

- erhöhte Steifigkeit der Karosserie (insbesondere Torsion):

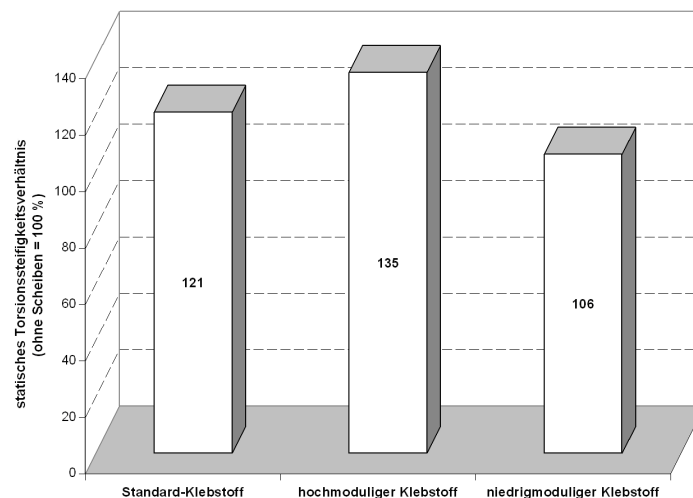


Bild 2: erhöhte Karosserie-Torsionssteifigkeit durch geklebte Frontscheibe (nach [2])

- Leichtbaupotential (schlankere A-, B- und C-Säulen)
- Akustik (Schwingungsdämpfung)
- Funktionsvereinigung Dichten/Tragen/Isolieren
- Design

Erfordernisse und technische Aspekte:

- Ausgleich thermischer Dehnungsunterschiede (Nachgiebigkeit, Klebschichtdicke)
- ausreichende Nachgiebigkeit des Verbundsystems bei mechanischer Verwindung (s. o: einseitiges Bordsteinparken, Gefahr des Scheibenbruchs)
- schnelle Anfangsfestigkeit (Wegfall von Scheibenfixierungen)
- ausreichende Festigkeit in möglichst kurzer Zeit (Fahrtest Rüttelstrecke) [4]
- Alterungsbeständigkeit (Feuchte, UV, Wärme)
- Vermeiden von Oberflächen-Vorbehandlungsmassnahmen (Kleben direkt auf lackierte Bleche)
- elektrische Isolation (integrierte Antenne)
- Klimaregelung bei Fertigung (feuchtigkeitshärtende Systeme)

- Reparaturmöglichkeit in der Werkstatt (Scheibenbruch, Wartezeit 3 bis 4 h [5])
- Forderung im Versagensfall: reiner Kohäsionsbruch in der Klebschicht ([4]).

Klebstoffe und Fügeteilwerkstoffe:

Als Klebstoffe kommen Polyurethan-Klebstoffe zum Einsatz. Die Klebschichtdicken liegen typischerweise in der Größenordnung von 5 mm [4]. Die Systeme weisen gegenüber klassischen PUR-Klebstoffen einen höheren Schubmodul auf (2,5 bis 3,5 MPa statt 1 MPa) und können hinsichtlich ihrer Dämpfungseigenschaften optimiert werden. Zusätzlich müssen die Klebstoffe beständig gegen Umwelteinflüsse sein. Als UV-Schutz wird eine keramische Beschichtung (UV-Blocker) auf die Glasscheiben aufgebracht.

Die PUR-Scheibenklebstoffe sind einkomponentige feuchtigkeitshärtende und beschleunigte Systeme.

Feuchtigkeitshärtende 1K-Systeme sind in ihrer Aushärtegeschwindigkeit abhängig vom Umgebungsklima und weisen eine Hautbildung auf, die den Aushärtevorgang von außen nach innen behindert. Aufgrund der zumeist nicht ausreichenden Anfangsfestigkeit sind mechanische Fixierungen zum Halten der Scheiben in der ersten Zeit nach dem Fügevorgang erforderlich [4].

Eine schnellere Aushärtung kann durch beschleunigte PUR-Scheibenklebstoffe erreicht werden. Diesen Systemen wird entweder ein feuchtehaltiger Zusatz zugemischt, der die Vernetzung der Klebschicht im gesamten Volumen unterstützt. Oder die Systeme beinhalten eine zusätzliche Komponente in Form eines Schmelzklebstoffs. Durch Erwärmen auf ca. 60 bis 80 °C wird diese Komponente aufgeschmolzen und dadurch benetzungsfähig. Nach dem Andrücken der Scheibe und dem damit verbundenen Abkühlen nimmt diese Komponente eine kautschukartige Konsistenz an und bewirkt eine ausreichend hohe Anfangsfestigkeit, so dass mechanische Fixierungen entfallen können.

Die Grundwerkstoffe der Füge­teile sind wie beim Structural Glazing Glas, Stahl und teilweise Aluminiumlegierungen. Die Glasscheiben werden generell mittels Primer vorbehandelt (Haftvermittler, u. U. Schwarzprimer gegen Fehler im Keramiksiebdruckrand). Blechseitig liegt immer eine lackierte Oberfläche vor, wobei oftmals auf die KTL-Schicht, und nicht auf den Decklack der Karosserie geklebt wird.

FEM bei Direktverglasung:

Im Automobilbau wird die FEM im Rahmen einer geschlossenen Simulationsprozesskette zur Auslegung eines voroptimierten virtuellen Prototypen eingesetzt (reduzierte „Time to Market“).

Strukturelle Berechnungen, wie die Analyse der Torsionssteifigkeit einer Karosserie, liefern wertvolle Informationen für die Enddimensionierung:

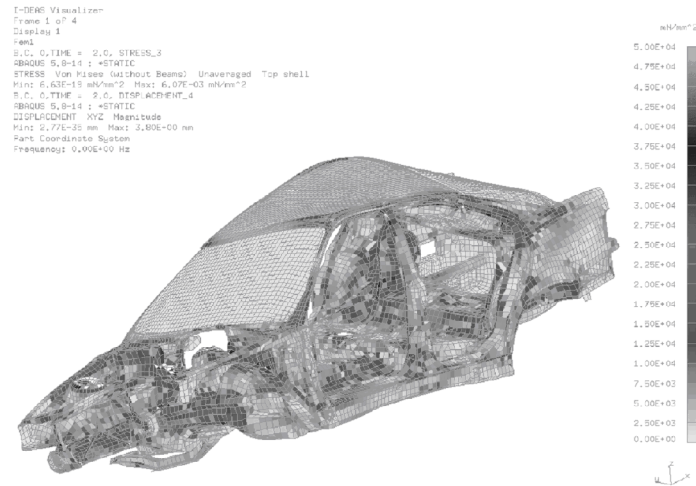


Bild 3: FE-Berechnung der statischen Torsion einer Karosserie mit Direktverglasung [2]

Die komplexen Geometrien werden unter Vorgabe überlagerter Lastfälle (statisch, dynamisch, thermisch) zur Optimierung z. B. der Klebschichtdicke und -breite und zur Überprüfung der Einhaltung der Spaltmasse berechnet. In naher Zukunft wird die Berechnung vollständiger Automobilmodelle mit bis zu 1 Million FE-Elementen angestrebt (Leistungsfähigkeit der Hardware).

Auch hier können bei Vorliegen entsprechend genauer Messdaten nicht-lineare sowie zeit- und temperaturabhängige Materialeigenschaften der Klebschichten berücksichtigt werden.

Für akustische Optimierungen einer Karosserie mit Direktverglasung (kritischer Bereich: Heckscheibe) sind nach [2] Scheibenklebstoffe mit niedrigem Modul und hoher Dämpfung erforderlich (Definition von Klebstoff-Eigenschaften aus Simulation). Standard-PUR-Systeme mit entsprechenden Eigenschaftsprofilen erfüllen dann aber u. U. in nicht mehr ausreichendem Masse die Forderung nach struktureller Tragfähigkeit. So werden aus der Berechnung Informationen über zielgerichtete Modifikationen der Klebstoffe gewonnen, oder, wie in [2] beschrieben, der Bedarf an vollständig neuen Klebsystemen (Zwei-Phasen-Verklebung) definiert.

Möglichkeiten der FEM im Vergleich Structural Glazing / Direktverglasung

Anhand der oben skizzierten Aspekte der beiden Einsatzbereiche der Klebtechnik lassen sich ohne Anspruch auf Vollständigkeit Gemeinsamkeiten für die Anwendung der FEM ableiten, die im Folgenden zusammen gefasst werden:

	Structural Glazing	Direktverglasung
FE-Modellierung	2D CAD (z. B. [7]), Schalen- und Volumenelemente	3D CAD, Schalen- und Volumenelemente, Simulationsprozesskette
Fügeteilwerkstoffe	Glas, Stahl, Aluminium	
Klebstoffe	Silicone (geringe Steifigkeit, hohe Dehnbarkeit, hohe Reißdehnung)	Polyurethane (etwas höhere Steifigkeit, quasi inkompressibel, hohe Dehnbarkeit)
Prüftechnik und Verifikation	Kleinteilprüfkörper Adhäsion und Kohäsion nach Norm, Module, Prototyp, Feldversuch (Langzeit), Bauaufsicht	nationale und internationale Normen, Werksnormen (u.a. Salzsprühtest), Module, Prototyp (Fahrversuch), Extremsituationen (Feldversuch Sahara), TÜV

FE-Berechnungen	statisch (Eigengewicht, Spannungskonzentrationen, schräg gestellte Scheiben)	statisch (Tragfähigkeit, Torsionssteifigkeit)
	thermisch (Klimawechsel, inhomogene Erwärmung, Wärmeleitung)	thermisch (z. B. Sonneneinstrahlung)
	gekoppelt thermomechanisch	
	dynamisch (Winddruck und –sog, Erdbeben)	dynamisch (Wind, Fahrbetrieb)
	nicht-lineares Material	nicht-lineares Material
	zeitabhängig (Kriechen, Viskoelastizität)	zeitabhängig (Hardening-Effekte in Blechbauteilen, Kriechen, Viskoelastizität)
	Modalanalysen	Modalanalysen
	Isolierglaseinheiten: Druckunterschiede	Simulation Airbag-Entfaltung (Druck gegen Frontscheibe)
	Designoptimierung	Designoptimierung
	FE-Simulation von Eigenspannungen und Schwindungseffekten [8]	FE-Simulation von Eigenspannungen und Schwindungseffekten [8]
QS: Effekte aus Schwankungen der Materialeigenschaften	QS: Effekte aus Schwankungen der Materialeigenschaften	
Stochastische FEM	Stochastische FEM	

Quellen:

- [1] **EOTA ETAG 002**, *Guideline for European technical approval of structural sealant glazing systems*
- [2] **M. Kroiss**, wiss. Forschungsarbeit zum Thema akustisch optimierte Scheibenverklebung, in Kooperation mit BMW AG, München, Sika AG, Zürich, und Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig, noch nicht veröffentlicht/to be published
- [3] **H. Seidel, Ch. Schmalt**, *Structural Glazing – Aufbau, Einsatz und Wirkungsweise; Glas- und Brüstungsmodule*, in: „Strukturelles Kleben und Dichten im Bauwesen“, Sonderdokumentationsreihe 12/1990, Klebstoff-Dokumentum, Hinterwaldner-Verlag
- [4] **B. Burchardt**, *Scheibenkleben im Automobilbau*, in: „Strukturelles Kleben und Dichten im Fahrzeugbau, fertigungstechnische Aufgaben und Lösungen in Gegenwart und Zukunft“, Sonderdokumentationsreihe 10/1988, Klebstoff-Dokumentum, Hinterwaldner-Verlag
- [5] <http://www.sika-industry.com/cmi-automotive/cmi-automotive-calculator.htm>, Online-Angebot der Sika AG, berechnet Wartezeit bei Scheibenersatz in Abhängigkeit vom gewählten Sika-Scheibenklebstoff (Stand: 10/2002)
- [6] **P. Janßen**, *Die erste bauaufsichtliche Zulassung für ein Structural-Glazing-System*, in: „Strukturelles Kleben und Dichten im Bauwesen“, Sonderdokumentationsreihe 12/1990, Klebstoff-Dokumentum, Hinterwaldner-Verlag
- [7] http://www.ais-online.de/pdc/index_6.html, Online-Angebot Architekten-Informationssystem, u.a. CAD-Daten und Anwendungsbeispiele von Fassadensystemen (Stand: 10/2002)
- [8] **Th. Böger, G. Schmöller**, *Finite Elemente Simulation der Klebstoffschwindung während des Aushärtvorgangs*, ADHÄSION kleben & dichten 10/2001